基于可持续发展目标的吉尔吉斯斯坦水环境承载力评价

王维璐[1]， 刘 铁[2,3]， 罗格平[2]

（1. 新疆大学生态与环境学院，新疆 乌鲁木齐 830046；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院中亚生态与环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：本研究借鉴2030可持续发展目标（SDGs）的评估指标，采用熵值法和层次分析法确定指标权重，利用主成分分析法分析2006—2020年吉尔吉斯斯坦水环境承载力变化趋势，通过向量模法确定了影响吉尔吉斯斯坦水环境承载力的主要影响要素。结果表明：2006—2020年吉尔吉斯斯坦水环境承载力总体呈增强趋势。水环境和社会经济子系统促进水环境承载力持续升高，而水生态和水资源子系统限制水环境承载力。人口密度、用水紧缺度、水体面积、可再生水资源人均占有量是限制水环境承载力的主要影响因素。增加城镇化率、提升用水效率、减少废污水排放量和提高废水处理率是吉尔吉斯斯坦水环境承载力提高的有效途径。

关键词：水环境承载力；可持续发展目标（SDGs）；主成分分析法；向量模法；吉尔吉斯斯坦

社会发展带来的人口激增，造成了更大的环境压力和资源消耗，水环境的破坏不仅成为全球性的环境问题，而且还影响区域环境可持续性发展[1]。目前，人们越来越重视可持续发展这一理念，在此基础上加入水环境的相关概念，形成了一系列水环境承载力相关研究[2-3]，反映了某一特定状况下水环境所能支撑的人口、经济、社会可持续发展的最大能力，是评价可持续性发展的重要指标之一[4-5]。2015年9月25日联合国大会决议通过《变革我们的世界：2030年可持续发展议程》，决议中SDGs（可持续发展目标）从经济、社会、环境三大维度指导全球可持续发展[6-7]，重视人与自然和谐共生关系，因此开展自然环境承载力的研究显得尤为重要。可持续发展理论与水环境承载力两者是相辅相成的关系，水环境承载力以可持续发展作为指导思想，保护环境和社会经济协调发展是实现可持续发展的前提，水环境承载力的提高是实现可持续发展的有效途径[8]。该发展目标为水承载力变化分析提供了新的角度和方法，来融合具体的可持续发展目标战略与水环境承载力。很多国内外的学者评价区域发展状态时，参考发展目标的具体指标，从不同角度构建指标体系[9-10]，其中水环境相关指标也是评价水环境可持续发展的重要手段[11]。

近年来，很多学者对水环境承载力评价进行了大量研究，包括模糊数学评价法[12]、系统动力学方法[13]、人工神经网络法[14-15]、向量模法[16]、主成分分析法[17]、综合评价指标法[18]、物元可拓模型评价法[19]等经典方法。方法多基于构建水环境指标体系和建立模型进行评价值计算，以此得到不同流域或不同地区的水环境承载力变化趋势。

吉尔吉斯斯坦是农牧业大国，灌区所产生农药和肥料残留破坏水体质量，土壤和水体盐渍化的主要原因也是农业污染[20]。其次，随着人口的增长，污水管理制度不完善、污水管理基础设施少导致河流和地下水中有机物、营养物质、病原体污染逐渐增加[21]。吉尔吉斯斯坦矿产资源丰富，广泛的开采

收稿日期：2020-04-27； **修订日期**：2020-06-04
基金项目：王宽诚率先人才计划"卢嘉锡国际团队项目"-中亚咸海生态与环境修复国际研究团队（GJTD-2020-14）；中国科学院国际合作课题-咸海流域重点灌区农业高效节水技术（131965KYSB20200029）
作者简介：王维璐（1998-），女，硕士研究生，研究方向为水环境承载力. E-mail: 739448479@qq.com
通讯作者：刘铁. E-mail: tie.liu@hotmail.com

造成水体和土壤中重金属和采矿污染物残留水平升高[22]。由此可见，吉尔吉斯斯坦水环境问题日益突出，但对于吉尔吉斯斯坦的研究主要集中在水资源与水污染方面，如Liu等[23]通过采集伊塞克湖盆地河流中38个水样，分析了枯水期(5月)和丰水期(7月和8月)的水化学组成和重金属主要离子，评估重金属对人类健康风险并找出重金属主要来源。Chen等[24]为解决水资源利用效率的评估困难的问题，采用中分辨率成像光谱仪(MODIS)总初级生产力(GPP)数据和MODIS蒸散量(ET)数据开发了一个水利用效率数据集(WUE)。开展吉尔吉斯斯坦水环境承载力评价是开展“一带一路”倡议的重要组成部分，也为结合可持续发展目标的评价和指标体系构建提供参考。

本文以吉尔吉斯斯坦为研究区，结合研究区域实际情况选取SDG2消除饥饿、SDG6清洁饮水和卫生设施、SDG8经济增长和SDG11可持续城市总目标的相关具体指标，建立吉尔吉斯斯坦水环境承载力评价指标体系，同时，采用主成分分析法评价2006—2020年吉尔吉斯斯坦水环境承载力变化趋势，并根据向量模法分析影响吉尔吉斯斯坦水环境承载力主要因子，为吉尔吉斯斯坦未来水环境保护和社会经济可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吉尔吉斯共和国，简称吉尔吉斯斯坦。其地理位置处于中亚东北部，国土面积约为198.50×10^3 km^2，是典型内陆国家。东南和东面与中国接壤，西南接壤乌兹别克斯坦，南部与塔吉克斯坦接壤，北和东北接壤哈萨克斯坦。吉尔吉斯斯坦多年实际取水总量7.7×10^9 m^3·a^{-1}，吉尔吉斯斯坦虽然河流、湖泊多，水资源总量丰富，但是水资源分布不均，部分地区存在缺水现象[25]。吉尔吉斯斯坦是以农牧业为主的国家，其中92%的总用水量用于农业取水，农药肥料和牲畜粪便污染较严重，因此水质波动较大。吉尔吉斯斯坦城市给排水和农业灌溉排碱设施还不够完善，用水效率较低，造成了水资源减少和水环境恶化的现象。目前，吉尔吉斯斯坦水资源管理和水环境保护力度仍显不足[26-27]。

1.2 数据来源

人均GDP、人口密度、城镇化率、废污水排放量、污水处理率、人均取水量总量、国家环境保护预算支出数据来源于吉尔吉斯共和国国家统计委员会(National Statistical Committee of the Kyrgyz Republic，http://www.stat.kg)和《环境保护》(吉尔吉斯共和国，包括伊塞克库尔湖地区的生态状况)。BOD排放量、氨氮排放量数据来源于吉尔吉斯斯坦水文气象局水文站点统计数据。用水效率、用水紧缺程度、森林覆盖比例、水体范围数据来源于联合国SDG6数据门户(https://www.sdg6data.org)和世界指数(https://www.indexmundi.com)。可再生水资源人均占有量、肥料消费量数据来源于Knoema数据中心(https://cn.knoema.com)。

1.3 水环境承载力指标体系的构建

在构建吉尔吉斯斯坦水环境承载力指标体系时，综合考虑吉尔吉斯斯坦自然地理条件，经济发展状况，选取可持续发展目标中与水环境承载力密切相关的指标，其中SDG6清洁饮水和卫生设施为水环境可持续发展提供具体指标参考，但根据指标选取原则和水环境承载力定义、并参考有关文献[28-30]，SDG6不能直接评价水环境承载力能力，还需参考与水环境承载力有密切关系的指标，目标SDG13气候行动、SDG14水下生物、SDG15陆地生物与实现水环境可持续性直接相关，目标SDG1消除贫穷、SDG2消除饥饿、SDG3健康福祉、SDG8经济增长、SDG11可持续城市的社会经济指标也有着间接潜在关系[31]。因此，构建了融合社会经济、水资源、水环境、水生态4个维度的水环境承载力评估体系如表1所示。

为了综合考量评价者主观意志和客观指标的离散性，采用主观和客观2种权重确定方法相结合确定权重，即熵值法和层次分析法分别进行对各指标的权重计算，再将两者的权重结果根据乘法集成法计算第i项指标综合权重(w_i)。计算公式为：

$$w_i = \frac{\theta_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^{m} \theta_i \gamma_i} \tag{1}$$

式中：θ_i为AHP法得到的第i项指标权重；γ_i为熵值法计算得到的第i项指标权重。

1.4 水环境承载力评价方法

为了得到吉尔吉斯斯坦2006—2020年逐年水环境承载力变化趋势和分析影响吉尔吉斯斯坦水环境承载力的主要要素，本研究分别采用主成分分

表1　基于SDG指标的吉尔吉斯斯坦水环境承载力综合评价指标体系

Tab. 1　Comprehensive evaluation index system of water environmental carrying capacity in Kyrgyzstan based on SDG index

准则层	指标	指标性质	计算方法	指标含义	对应SDG目标
社会经济	人均GDP/美元	+	国内生产总值/总人口	经济发展状况	可持续经济增长(SDG8)
	人口密度/(人·km^{-2})	−	总人口/总面积	人口聚集程度	可持续城市(SDG11)
	城镇化率/%	+	(城镇人口/总人口)×100%	城镇化程度	可持续城市(SDG11)
	国家环境保护预算支出/百万索姆	+	统计数据	地区水环保工作投资力度	水和环境卫生(SDG6)
水资源	用水效率/(美元·m^{-3})	+	总产值/(用水量−回流量)	用水效率	水和环境卫生(SDG6)
	用水紧缺程度/%	−	总可再生淡水资源/(总水资源量+降水量−生态环境用水量)	用水压力	水和环境卫生(SDG6)
	人均取水量总量/(m^3·人$^{-1}$·a^{-1})	−	总取水总量/总人口	生产、生活取水水平综合指标	水和环境卫生(SDG6)
水环境	BOD排放量/t	−	观测数据	水体水质污染情况	水和环境卫生(SDG6)
	氨氮排放量/t	−	观测数据	水体水质污染情况	水和环境卫生(SDG6)
	肥料消费量/(kg·hm^{-2})	−	统计数据	农业污染压力	消除饥饿(SDG2)
	废污水排放量/10^8 m^3	−	观测数据	水体水质污染情况	水和环境卫生(SDG6)
	污水处理率/%	+	(污水排放量/废水站收集的废水量)×100%	污水处理能力	水和环境卫生(SDG6)
水生态	森林覆盖比例/%	+	森林面积/国土面积	土地覆被与水源涵养	可持续陆地生态系统(SDG15)
	水体范围/km^2	+	观测数据	水资源整体丰裕程度	水和环境卫生(SDG6)
	可再生水资源人均占有量/(m^3·人$^{-1}$)	+	当地可再生水资源总量/总人口	水资源丰缺及发展潜力	水和环境卫生(SDG6)

析法和向量模法进行分析。

1.4.1　*主成分分析法*　主成分分析方法是一种使用最广泛的数据降维算法[32]。该方法能用少数影响水环境承载力的因子反映所有影响因子,消除了各要素之间的共线性,从而减少分析要素,提高分析效率[33]。用主成分分析法分析水环境承载力时,首先使用极差标准化方法对数据进行归一化处理;其次根据相关系数矩阵判定各指标之间的相关性;然后由特征值和累计贡献率确定反映水环境承载力主要因子的个数;接着用表达式表达主成分得分F_i;最后以主成分贡献率为权数计算出综合得分,作为评价水环境承载力的评价标准。

1.4.2　*向量模法*　在水环境承载力评价中,向量模型法将各指标归一化后的值与其权重乘积结果均用向量表示,量化表达各子系统或各指标水环境承载力的评价结果[34]。在分析第n个水平年的第m个评价值时即可利用归一化建立对应的矢量模型[35]。

评价不同水平年的水环境承载力评价值时,向量模法中E_j(j=1,2,…,m)表示评价值,m为评价水平年,n为分量个数,w_i(i=1,2,…,n)为每个评价值分量即具体指标所占比重,E_j可表示为E_{1j},E_{2j},…,E_{nj},使用归一化可将第j个评价值的大小表示为矢量模[36],即:

$$\left|E_j\right| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(w_i \bar{E}_{ij}\right)^2} \tag{2}$$

式中:w_i为水环境承载力第i个指标的权重;$\bar{E}_{ij}$为各指标无量纲化后的值。

2　结果与分析

2.1　基于主成分分析法的水环境承载力评价

由于各指标的数量级不同,本文采用极差标准化法对指标数值做无量纲标准化处理后,进行主成分分析。

由表2可以看出,前3个主成分的累计贡献率已达到91.555%,且特征值均大于1,基本包含了绝大部分评价指标的原始信息,可以用来描述水环境承载力。因此选取前3个主成分来表达主成分得分。

前3个主成分在各变量的载荷结果如表3所示,第一主成分与用水效率、人均取水量总量、森林

表2 主成分特征值和贡献率

Tab. 2 Characteristic values and contribution rates of principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
第一主成分	10.708	71.385	71.385
第二主成分	1.79	11.931	83.316
第三主成分	1.236	8.238	91.555
第四主成分	0.6	3.999	95.554

表3 因子载荷矩阵

Tab. 3 Component matrix

变量	主成分一	主成分二	主成分三
人均GDP	0.944	−0.018	0.02
人口密度	−0.971	0.188	−0.033
城镇化率	0.845	−0.432	0.126
国家环境保护预算支出	0.891	0.246	−0.151
用水效率	0.984	−0.106	0.064
用水紧缺程度	−0.868	0.354	0.302
人均取水量总量	0.969	−0.029	0.005
BOD排放量	0.768	0.147	0.173
氨氮排放量	−0.156	−0.843	0.313
肥料消费量	0.328	−0.05	−0.922
废污水排放量	0.769	0.526	0.217
污水处理率	0.796	0.554	0.197
森林覆盖比例	0.962	−0.17	0.155
水体范围	−0.946	−0.019	0.112
可再生水资源人均占有量	−0.97	0.148	−0.025

覆盖比例呈显著正相关，与人口密度呈显著负相关。因此，第一主成分反映水环境受社会经济、水资源和水生态方面的影响；第二主成分与污水处理率、废污水排放量呈现出显著的正相关，与氨氮排放量、城镇化率呈显著的负相关，可见第二主成分涵盖水环境和社会经济的主要因子；第三主成分与氨氮排放量、用水紧缺程度呈现出显著的正相关，与肥料消费量支出呈显著的负相关，第三主成分涵盖水资源和水环境的主要因子。3个主成分覆盖了社会经济、水环境、水生态、水资源，因此各子系统之间具有显著的相关性，能够反映水环境承载力状况，可以用作水环境承载力的评价指标体系。

主成分得分如表4所示，根据综合得分模型计算得到吉尔吉斯斯坦2006—2020年水环境承载力综合得分值。

主成分综合得分值越大可以表示该年份水环境承载能力越强，正值表明处于平均水平之上，负值表明在平均水平之下。通过表4综合得分排序显示，2006—2020年吉尔吉斯斯坦水环境承载力总体呈上升趋势。2009年和2015年水环境承载力显著上升，除2020年外，其余年份水环境承载力虽也呈上升状态，但上升速度较为缓慢。

2.2 影响因素分析

为进一步分析影响水环境承载力主要变化的因素，采用向量模法对子系统和各指标对总体的影

表4 2006—2020年水环境承载力综合得分值

Tab. 4 Scores of water environmental capacity from 2006 to 2020

年份	F_1	F_2	F_3	综合得分	排序
2006	−1.07	−0.01	0.34	−0.81	14
2007	−0.96	−0.03	0.3	−0.73	13
2008	−0.67	0.09	0.13	−0.5	12
2009	0.17	1.1	0.54	0.33	11
2010	0.29	0.78	0.71	0.39	10
2011	0.36	1.22	0.26	0.46	9
2012	0.48	0.92	0.62	0.55	8
2013	0.6	0.63	0.85	0.63	7
2014	0.78	0.74	1	0.8	6
2015	1.59	0.42	−0.02	1.3	5
2016	1.73	0.5	0.03	1.42	4
2017	2.06	0.28	−0.06	1.64	3
2018	2.14	0.1	0.55	1.73	1
2019	2.13	0.04	0.65	1.73	1
2020	2.13	−0.08	0.66	1.71	2

响程度进行评价。进行向量模法分析时,需要各指标的权重分析。因此,根据层次分析法和熵值法计算公式得到吉尔吉斯斯坦水环境承载力各指标权重计算结果(表5)。组合权重较高的是人口密度、城镇化率、用水紧缺程度、废污水排放量、水体范围。

根据各指标权重结果和公式(2)计算得到水环境承载力评价值。各子系统评价结果见图1。结果表明,水环境评价值在2006—2010年呈显著上升趋势,在2011年下降,2012—2015年趋于上升状态,2016年有小幅下降趋势,2017年达到最高值,后期逐渐平缓,总体水平较高的原因是由于废污水排放量减少和污水处理率的提高。水资源评价值2006—2014年稳步上升,在2015年下降,后又缓慢升高,由于人口增加和社会进步导致的用水压力较高,水资源的有效利用仍需改善。水生态评价值总体呈下降状态,虽然2013年,2014年、2016年和2018年升高,但仍是制约水环境承载力的重要影响因子之一。水生态系统中森林具有保土、调节水量、净化水质等生态价值,吉尔吉斯斯坦虽然水资源丰富,但是森林覆盖面积较少,仅占全国5%左右。另外,随着经济社会发展,水体范围也逐渐减少。总体来说,随着时间发展,吉尔吉斯斯坦综合指标显著增强,对水环境承载力有显著影响的子系统是水环境和社会经济子系统,2个子系统的评价值显著提升,使得水环境承载力总体呈上升状态。

根据各指标权重结果和公式(2)计算得到各指标水环境承载力评价值。各指标评价值变化趋势见图2,由图2a可以看出,对社会经济评价值升高影响较大的为城镇化率和人均GDP。国家环境保护预算支出的评价值上升趋势不明显;此外人口的增加使得人口密度评价值的下降,成为制约水环境承载力的主要影响因素。

图2b水资源系统中,吉尔吉斯斯坦主要以灌溉农业为主,由于减少作物种植,水利灌溉设施不断完善[37],用水效率和人均取水总量评价值稳步上升,根据用水紧缺度的计算方法进行分析,该评价值在2015年下降,是由于总水资源量的减少,所以在保护水资源的同时减轻用水压力,提高水资源利用效率最好的方法是优化水资源配置,进行统一管理地表水和地下水,其次不断改进灌溉基础设施,减少水资源浪费[38]。

图2c水环境系统中,由于含有硝酸盐、氯化物、铬、硫酸盐、石油和石油产品、重金属和其他物质的未经处理的废水排入地表水体,水环境状况不仅受到影响,而且对人们的健康产生负面影响。水污染主要来源于农业和工业排放、城市污水系统和畜牧场和城市废物。陈旧的污水处理厂的运行导致未经充分处理的废水排放。为改善水环境状况,政府制定了水资源合理利用政策,同时《水法》的实施使得废污水排放量和污水处理率变化最显著,尤其是

表5 指标权重计算结果

Tab. 5 Index weight calculation results

指标	熵值法	AHP法	组合权重
人均GDP	0.07043	0.03176	0.04087
人口密度	0.09961	0.07968	0.14503
城镇化率	0.03522	0.20893	0.13445
国家环境保护预算支出	0.04980	0.03664	0.03335
用水效率	0.08041	0.04350	0.06392
用水紧缺程度	0.05065	0.15204	0.14072
人均取水量总量	0.03191	0.05694	0.03320
BOD排放量	0.05027	0.05508	0.05060
氨氮排放量	0.08962	0.01228	0.02012
肥料消费量	0.04036	0.03181	0.02346
废污水排放量	0.16922	0.02972	0.09188
污水处理率	0.12526	0.02598	0.05946
森林覆盖比例	0.01834	0.06028	0.02020
水体范围	0.06057	0.07222	0.07993
可再生水资源人均占有量	0.03333	0.10314	0.06282

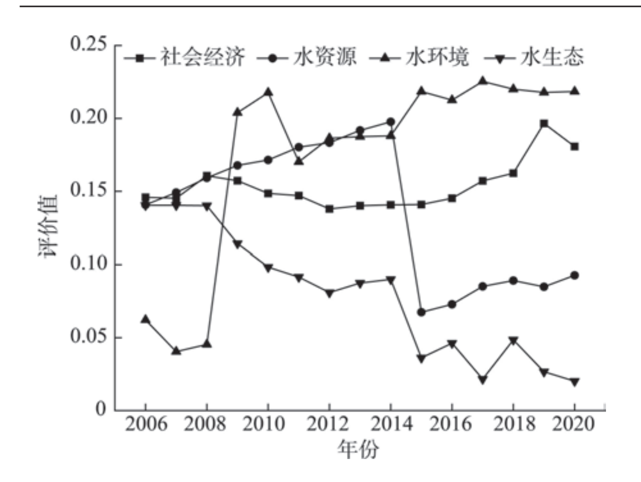


图1 不同年份吉尔吉斯斯坦各子系统水环境承载力

Fig. 1 Water environmental carrying capacity of all subsystems in Kyrgyzstan in different years

在2009年评价值有明显升高,废污水排放量减小和污水处理率的提高对水环境承载力影响较大。BOD排放量变化取决于水体污染的程度,2009年评价值有明显上升说明污水处理取得一定成效。氨氮排放量、肥料消费量变化趋势不明显,但评价值总体也呈小幅上升状态。氨氮、铵离子的主要来源是农场动物、生活废水以及食品和化学工业的废水。因此必须制定环境保护措施,尤其是改善处理设施和加强环境监测。

图2d水生态系统中,虽然吉尔吉斯斯坦淡水资源量丰富,但是其空间和时间分布不均匀,人口不断增加导致可再生水资源人均占有量也不断减少[39]。高失水率和安全供水不足,使得水体范围变化幅度呈波动状态,在2009年、2015年、2017年和2019年骤减,水体范围和水资源量成为吉尔吉斯斯坦保持水环境承载力的难题。

3 结 论

本文以吉尔吉斯斯坦为研究区域,借鉴2030可持续发展目标(SDGs)的相关具体指标,突出水在环境中可持续发展作用,建立了"社会经济-水资源-水环境-水生态"评价指标体系,对水环境承载力变化特征进行综合评估。

通过主成分分析法分析吉尔吉斯斯坦2006—2020年各年份的水环境承载力评价值,研究结果表

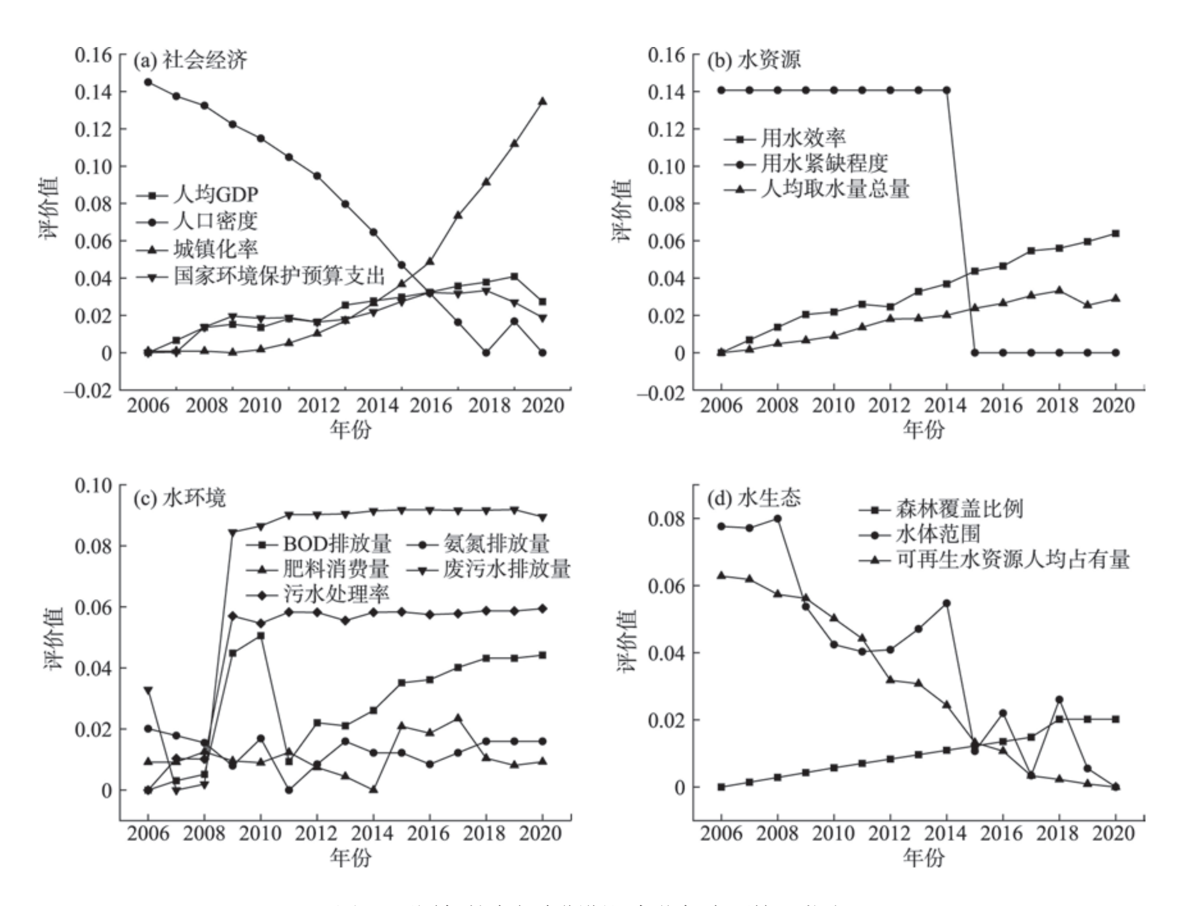


图2 不同年份吉尔吉斯斯坦各指标水环境承载力

Fig. 2 Water environmental carrying capacity of different indexes in Kyrgyzstan in different years

明:除2020年外,水环境承载力总体呈上升趋势,2009年和2015年上升较快,其余年份水环境承载力虽也呈上升状态,但上升速度较为缓慢。主要由于水生态和水资源方面的限制作用上升较为缓慢,由于水资源合理利用政策,同时《水法》的实施使得水环境系统上升最显著。

根据向量模法对各子系统评价结果分析发现,水环境系统对水环境承载力结果影响较大,其总体水平较高,加之社会经济系统也呈上升趋势,二者为水环境承载力的提升提供了有利条件;同时,水生态系统的下降和水资源系统的波动变化成为水环境承载力的限制因素。各指标对水环境承载力影响的结果分析发现,对水环境承载力升高的有利指标主要是城镇化率、用水效率、人均取水总量、废污水排放量、污水处理率;限制性指标主要有人口密度、用水紧缺程度、水体范围、可再生水资源人均占有量。

参考文献(References):

[1] Li Yizhen, Ma Long, Li Yaoming, et al. Exploration of the driving factors and distribution of fecal coliform in rivers under a traditional agro-pastoral economy in Kyrgyzstan, Central Asia[J]. Chemosphere, 2022, 286(2): 131700-131708.

[2] 李清龙, 王路光, 张焕祯, 等. 水环境承载力理论研究与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(1): 87-89. [Li Qinglong, Wang Luguang, Zhang Huanzhen, et al. Research and prospect on theoretical framework of water environmental bearing capacity[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(1): 87-89.]

[3] Song Weiwei, Pang Yong. Research on narrow and generalized water environment carrying capacity, economic benefit of Lake Okeechobee, USA[J]. Ecological Engineering, 2021, 173: 106420-106432.

[4] 汪嘉杨, 翟庆伟, 郭倩, 等. 太湖流域水环境承载力评价研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1979-1987. [Wang Jiayang, Zhai Qingwei, Guo Qian, et al. Study on water environmental carrying capacity evaluation in Taihu Lake Basin[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1979-1987.]

[5] Lu Yan, Xu Hongwen, Wang Yuexiang, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity of city in Huaihe River Basin based on the AHP method: A case in Huai'an City[J]. Water Resources and Industry, 2017, 18: 71-77.

[6] 朱磊, 陈迎. "一带一路"倡议对接2030年可持续发展议程——内涵、目标与路径[J]. 世界经济与政治, 2019(4): 79-100. [Zhu Lei, Chen Ying. Integrating Belt and Road initiative with UN 2030 sustainable development a genda: Connotations and routes[J]. World Economics and Politics, 2019(4): 79-100.]

[7] Rodrigo G G C, Walter L F, Osvaldo L G Q, et al. A literature-based review on potentials and constraints in the implementation of the sustainable development goals[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198(10): 1276-1288.

[8] 陈文婷, 郑明霞, 夏青, 等. 基于产业细化和多要素约束的白洋淀流域水环境承载力系统动力学模拟与调控[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(2): 345-357. [Chen Wenting, Zheng Mingxia, Xia Qing, et al. System dynamics simulation and control strategy of water environment carrying capacity in Baiyangdian Basin based on industry refinement and multifactor constraint[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(2): 345-357.]

[9] Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Large hydrological processes changes in the Transboundary Rivers of Central Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(10): 5059-5069.

[10] 程清平, 钟方雷, 左小安, 等. 美丽中国与联合国可持续发展目标(SDGs)结合的黑河流域水资源承载力评价[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 204-214. [Cheng Qingping, Zhong Fanglei, Zuo Xiao'an, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Heihe River Basin combining beautiful China with SDGs[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 204-214.]

[11] Ravn B E, Kørnøv L, Lyhne I, et al. Integrating SDGs in environmental assessment: Unfolding SDG functions in emerging practices [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2021, 90: 106632-106641.

[12] Zou Zhihong, Yun Yi, Sun Jingnan. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 1020-1023.

[13] Wang Y M, Zhou X D, Engel B, et al. Water environment carrying capacity in Bosten Lake basin[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 574-583.

[14] 余金龙, 尹亮, 鲍广强, 等. 基于BP神经网络的腾格里湖水环境承载力研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(11): 83-86. [Yu Jinlong, Yin Liang, Bao Guangqiang, et al. Research on water environmental carrying capacity of Tenggeli Lake based on BP neural networks[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(11): 83-86.]

[15] 曹若馨, 张可欣, 曾维华, 等. 基于BP神经网络的水环境承载力预警研究——以北运河为例[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 147-149. [Cao Ruoxing, Zhang Kexin, Zeng Weihua, et al. Research on the early-warning method of water environment carrying capacitybased on BP neural network: A case study of Beiyunhe River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(5): 147-149.]

[16] 南楠. 基于灰色关联理论与SD模型的江苏省水环境承载力研究[D]. 南京: 南京大学, 2012. [Nan Nan. Study on Water Environmental Carrying Capacity of Jiangsu Province Based on Grey Cor-

relation Theory and SD Model[D]. Nanjing: Nanjing university, 2012.]

[17] 查木哈, 吴琴, 马成功, 等. 基于DPSIR模型评价内蒙古水环境承载力[J]. 内蒙古农业大学学报, 2020, 41(6): 65-73. [Cha Muha, Wu Qing, Ma Chenggong, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity based on dpsir model in Inner Mongolia [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 65-73.]

[18] Wang Xiaoyan, Liu Lei, Zhang Silong. Integrated model framework for the evaluation and prediction of the water environmental carrying capacity in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Ecological Indicators, 2021, 130: 108083-108093.

[19] 赵东, 严家家, 陈林林, 等. 基于物元可拓模型的邳城灌区水环境承载力评价[J]. 水利技术监督, 2021(8): 153-156. [Zhao Dong, Yan Jiajia, Chen Linlin, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity in API City irrigation District based on matter-element extension model[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2021(8): 153-156.]

[20] Liu Y, Wang P, Boris G, et al. A review of water pollution arising from agriculture and mining activities in Central Asia: Facts, causes and effects[J]. Environmental Pollution, 2021, 291: 118209-118219.

[21] Trnqvist R, Jarsj J, Karimov B. Health risks from large-scale water pollution: Trends in Central Asia[J]. Environment International, 2011, 37(2): 435-422.

[22] Karthe D, Abdullaev I, Boldgiv B, et al. Water in Central Asia: an integrated assessment for science-based management[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(20): 1-15.

[23] Liu Wen, Ma Long, Li Yaoming, et al. Heavy metals and related humanhealth risk assessment for river waters in the Issyk-Kul Basin, Kyrgyzstan, Central Asia[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(10): 3506-3518.

[24] Chen Yaning, Fang Gonghuan, Hao Haichao, et al. Water use efficiency data from 2000 to 2019 in measuring progress towards SDGs in Central Asia[J]. Big Earth Data, 2022, 6(1): 90-102.

[25] Hill A, Wilson A, Minbaeva C, et al. Hydrologic controls and water vulnerabilities in the Naryn River Basin, Kyrgyzstan: A socio-hydro case study of water stressors in Central Asia[J]. Water, 2017, 9(5): 325-340.

[26] 于水, 陈迪桃, 黄法融, 等. 中亚农业水资源脆弱性空间格局及分区研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(4): 11-20. [Yu Shui, Chen Ditao, Huang Farong, et al. Spatial pattern and zoning of agricultural water resources vulnerability during crop growth period in Central Asia[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(4): 11-20.]

[27] 吴淼, 张小云, 王丽贤, 等. 吉尔吉斯斯坦水资源及其利用研究[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 455-462. [Wu Miao, Zhang Xiaoyun, Wang Lixian, et al. Study on water resources and its utilization in Kyrgyzstan[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 455-462.]

[28] 崔丹, 陈馨, 曾维华. 水环境承载力中长期预警研究——以昆明市为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1174-1184. [Cui Dan, Chen Xin, Zeng Weihua. Investigations on the medium-to-long term early warning of water environmental carrying capacity: A case study of Kunming City[J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 1174-1184.]

[29] 王富强, 李鑫, 赵衡, 等. 基于水环境容量和综合指标体系的区域水环境承载力评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 24-31. [Wang Fuqiang, Li Xin, Zhao Heng, et al. Evaluation of regional water environment carrying capacity based on water environment capacity and comprehensive index system[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 24-31.]

[30] 徐志青, 刘雪瑜, 袁鹏, 等. 南京市水环境承载力动态变化研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(4): 557-564. [Xu Zhiqing, Liu Xueyu, Yuan Peng, et al. Dynamic change of water environment carrying capacity in Nanjing City[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(4): 557-564.]

[31] Ho L, Goethals P L. Opportunities and challenges for the custainability of lakes and reservoirs in relation to the Sustainable Development Goals(SDGs)[J]. Water, 2019, 11(7): 1462-1480.

[32] Wu F, Zhuang Z C, Liu H L, et al. Evaluation of water resources carrying capacity using principal component Analysis: An empirical study in Huai'an, Jiangsu, China[J]. Water, 2021, 13(18): 2587-2599.

[33] 贺辉辉, 丁珏, 程宇, 等. 安徽省淮河流域水环境承载力动态评价研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S2): 280-287. [He Huihui, Ding Jue, Cheng Yu, et al. Dynamic evaluation of water environment carrying capacity of Huai River in Anhui Province[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(S2): 280-287.]

[34] 赵传起, 朱悦, 王留锁, 等. 基于系统动力学和向量模法的亮子河流域水环境承载力评价[J]. 环境保护科学, 2021, 47(1): 136-142. [Zhao Chuanqi, Zhu Yue, Wang Liusuo, et al. Evaluation of water environment carrying capacity of Liangzihe River Basin nased on system dynamics and vector norm method[J]. Environmental Protection Science, 2021, 47(1): 136-142.]

[35] 郑毅, 蒋进元, 杨延梅, 等. 基于向量模法的南宁市水环境承载力评价分析[J]. 环境影响评价, 2017, 39(1): 65-68. [Zheng Yi, Jiang Jinyuan, Yang Yanmei, et al. Assessment and analysis on water environment carrying capacity based on vector norm method in Nanning[J]. Environmental Impact Assessment, 2017, 39(1): 65-68.]

[36] 白辉, 刘雅玲, 陈岩, 等. 层次分析法与向量模法在水环境承载力评价中的应用——以胶州市为例[J]. 环境保护科学, 2016, 42(4): 60-65. [Bai Hui, Liu Yaling, Chen Yan, et al. Application of analytic hierarchy process and vector norm method in evaluation of water environmental carrying capacity in Jiaozhou City[J]. Environmental Protection Science, 2016, 42(4): 60-65.]

[37] Sorg A, Mosello B, Shalpykova G, et al. Coping with changing wa-

ter resources: The case of the Syr Darya river basin in Central Asia [J]. Environmental Science & Policy, 2014, 43(S1): 68−77.
[38] Wang Xuanxuan, Chen Yaning, Li Zhi, et al. Development and utilization of water resources and assessment of water security in Central Asia[J]. Agricultural Water Management, 2020, 240: 106297−106307.
[39] Zakir B, Kamshat T, Ronny B, et al. Water related health problems in Central Asia: A review[J]. Water, 2016, 8(6): 219−231.

An evaluation of water environmental carrying capacity in Kyrgyzstan based on sustainable development goals

WANG Weilu[1], LIU Tie[2,3], LUO Geping[2]
(1. College of Resources & Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China;
2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Kyrgyzstan is an important transportation hub for the countries along The Belt and Road Initiative in China, which is rich in mineral resources, has an underdeveloped economy, has frequent human activities, and has relatively weak ecological environmental protection, resulting in major water environmental problems. Drawing on the evaluation indicators of the 2030 Sustainable Development Goals, this study uses the entropy and the analytic hierarchy methods to determine the weights of the indicators, analyzes the change trend of the carrying capacity of the water environment in Kyrgyzstan from 2006 to 2020 using the principal component analysis method, and determines the main influencing factors affecting the carrying capacity of the water environment in Kyrgyzstan using the vector model method. The results show that the carrying capacity of the water environment in Kyrgyzstan from 2006 to 2020 shows an overall enhancement trend. The water environment and socio-economic subsystems promote the continuous increase in the carrying capacity of the water environment, while the water ecology and water resource subsystems limit the carrying capacity of the water environment. Population density, water shortage, water body area, and per capita share of renewable water resources are the main influencing factors limiting the water environment's carrying capacity. Increasing the rate of urbanization, improving the efficiency of water use, reducing the discharge of wastewater, and increasing the rate of wastewater treatment are effective ways to improve the water environment's carrying capacity in Kyrgyzstan.

Keywords: water environmental carrying capacity; sustainable development goals; principal component analysis method; vector modulus method; Kyrgyzstan